



数字信号处理及其C语言算法

李径纬 编 写

数字信号处理及其 C 语言算法

李经纬 编

北京希望电脑公司

内容提要

数字信号处理是近十年来发展非常迅速的一门学科，已广泛应用于通信、航天、石油地质、生物医学、语音识别、图像处理等学科领域。随着计算机性能价格比的不断提高，数字信号处理技术的重要性已越来越为人们所认识。

本书是一本关于数字信号处理的实用性书籍，重点讨论 DSP 技术的 C 语言算法。主要内容包括：DSP 数据文件格式和用户接口，滤波技术，离散付里叶变换和 FFT，基本的矩阵和向量运算，以及图像处理技术。

本书可供学习数字信号处理技术的读者以及应用 DSP 技术解决实际问题的广大工程技术人员使用。需要本书的用户，请直接与北京 8721 信箱联系，电话：2562329，邮政编码：100080。

数字信号处理及其 C 语言算法

李经纬 编

北京希望电脑公司 双青印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张： 字数： 千字

京准印字：3329—90329 内部成本价：15.00元

目 录

前言	3
第一章 数字信号处理基础	4
1.1 序列	4
1.2 线性时不变算子	11
1.3 数字滤波器	19
1.4 离散付里叶变换	26
1.5 非线性算子	33
1.6 线性代数: 矩阵与向量	37
1.7 概率与随机过程	40
1.8 二维信号处理	52
第二章 C 语言程序设计基础	57
2.1 DSP 程序设计要素	57
2.2 变量和数据类型	59
2.3 操作符	63
2.4 程序控制	66
2.5 函数	70
2.6 宏与 C 预处理器	74
2.7 指针和数组	76
2.8 结构	80
2.9 输入和输出	84
2.10 C 程序设计的常见错误	87
2.11 程序设计风格	90
第三章 用户接口与磁盘存贮	95
3.1 用户接口	95
3.2 磁盘存贮格式	98
3.3 DSP 数据的图形显示	112
第四章 滤波子程序	118
4.1 数字滤波器与模拟滤波器	118
4.2 FIR 滤波器	119
4.3 IIR 滤波器	132
4.4 实时滤波器	150
4.5 插值与抽取	154
4.6 复数滤波器	165
4.7 滤波去噪声	172
4.8 非线性滤波	192
第五章 离散付里叶变换	199
5.1 离散付里叶变换程序	199

5.2	离散付里叶逆变换	204
5.3	快速付里叶变换程序	204
5.4	逆 FFT 程序	212
5.6	幅度, 相位和对数显示	216
5.7	实数输入序列的优化 FFT	217
5.8	付里叶变换举例	220
5.9	利用 FFT 完成快整卷积	238
5.10	功率谱估计	242
5.11	利用付里叶变换进行插值	247
第六章	矩阵和向量运算	251
6.1	向量运算	251
6.2	矩阵运算	263
6.3	矩阵的磁盘存贮	283
6.4	最小平方曲线拟合	286
第七章	图像处理	298
7.1	图像变的技术	298
7.2	直方图处理	313
7.3	二维卷积	320
7.4	非线性图像处理	337
附录 A	标准 C 函数库	346
A.1	数学函数	346
A.2	字符串函数	347
A.3	存贮分配函数	249
A.4	标准输入输出函数	350
A.5	其它标准函数	354
附录 B	DSP 函数库与 DSP 程序	355
B.1	DSP 库函数	355
B.2	DSP 程序	370

前 言

随着计算机的功能不断增强，速度越来越快，尤其是微处理器的迅猛发展，信号和序列的数字处理技术变得越来越重要和具有现实性。数字信号处理 (DSP) 在工程领域具有广泛的应用范围，下面是一些常见的 DSP 应用领域。

- (1) 雷达信号处理;
- (2) 超声与声纳信号处理;
- (3) 图像处理;
- (4) 语音信号处理;
- (5) 通讯信号处理;
- (6) 医学信号处理;

C 语言既有强大的功能，又有很高的效率，它比其它高级语言更适合于 DSP 实时性强，计算量大的特点。C 语言丰富的数据结构和操作对信号处理极为方便，其操作特性对编制大的 DSP 应用程序十分重要。选用 C 语言的另一原因是 C 语言的广泛性。从微处理机到工作站和中大型机一般都支持 C 语言。本书中的 DSP 程序适于 UNIX, MS-DOS 以及其它实时环境下的 C 编译器。

本书的对象是熟悉数字信号处理和 C 语言的工程师，但并不要求读者是这方面的专家。本书的目的是帮助读者编写有效而紧凑的 DSP 应用程序，以解决实际的信号处理问题。需要编写 DSP 程序的科研人员也可从本书的理论与实践结合中得到帮助。本书给出了大量有效的 DSP 算法，它们对于学习数字信号处理和快速数字技术的学生尤其有用。书中所有的 DSP 函数可以建成一个 C 函数库，以供编写 DSP 应用程序时调用。

本书分为七章。第一章和第二章分别介绍数字信号处理和 C 语言程序设计的基础知识，熟悉这些内容的读者可以跳过其中一章或两章。第三章介绍 DSP 数据文件的格式和用户接口程序，它是以后各章的基础。第四章和第五章讨论一组数字信号处理的基本技术。其中第四章介绍数字滤波技术，第五章介绍频域处理技术。第六章和第七章讨论二维信号处理。其中第六章介绍基本的矩阵和向量运算例程。第七章介绍如何用矩阵例程进行二维图像处理。

第一章 数字信号处理基础

数字信号处理的对象是量化后的随时变化的离散信号，它以数值量序列的形式进入计算机。图 1.1 是数字信号处理的一个例子，其中 $x(n)$ 为输入序列， $\circ\{\}$ 为运算符， $y(n)$ 为输出序列。运算符可分为线性与非线性两类，图 1.2 是本快所用运算符的分类结构图。

运算符作用于信号序列可以有以下效果：

- (1) 从序列中提取参数或特征。
- (2) 增强或去除某些特征并产生一个类似序列。
- (3) 将序列恢复到先前的某个状态。
- (4) 对序列进行编码或压缩。

一个完整的数字信号处理系统可能在同一信号序列上施加很多运算，还可以在运算结果上施加新的运算。图 1.3 就是一个例子。

本章内容分为八节。1.1 节讨论数字的序列：序列的产生、频谱及其与连续信号的关系。1.2 节描述数字信号处理中用得最频繁的线性时不变运算符的共同特性。1.3 节讨论一类特定的运算符——数字滤波器。1.4 节介绍离散付里叶变换(DFT)，1.5 节描述常用非线性运算的性质。1.6 和 1.7 节介绍线性代数和概率论基础及其在信号处理中的应用。最后，1.8 节将一维信号处理扩充到二维信号处理。

1.1 序列

为了便可数字计算机处理信号，必须对信号按时间间隔进行采样。图 1.4 中的例子表示的是按间隔 T (单位为秒)对一个连续时间函数采样的情况。设连续时间函数为 $x(t)$ ，那么第 n 个采样值为 $x(nt)$ 也可以是一个空间坐标，比如说 x ，那么连续函数为 $f(x)$ ，采样函数为 $f(nx)$ ，其中 X 是距离上的采样间隔。扩展到二维的情形，连续函数为 $f(x, y)$ ，如果物的二维图像表示。二维信号处理将在 1.8 节中讨论。

通常情况下都将采样间隔规范化为 1，则采样序列为 $x(n)$ 。应当注意的是，在从序列计算能量时，必须在适当的地方重新加入采样间隔，时间域或噤间域都是如此。

序列作为连续时间信号的表示具有以下重要性质：

- (1) 信号已采样，它仅在离散时间点上具有有限值。
- (2) 信号已量化；其幅度为有限离散量，精度取决于计算机本身的精度。
- (3) 信号在某一有限时间以外被截尾。

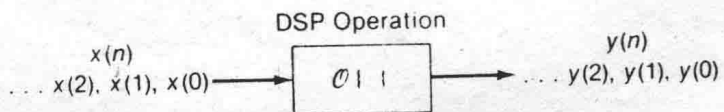


图 1.1 DSP 运算符

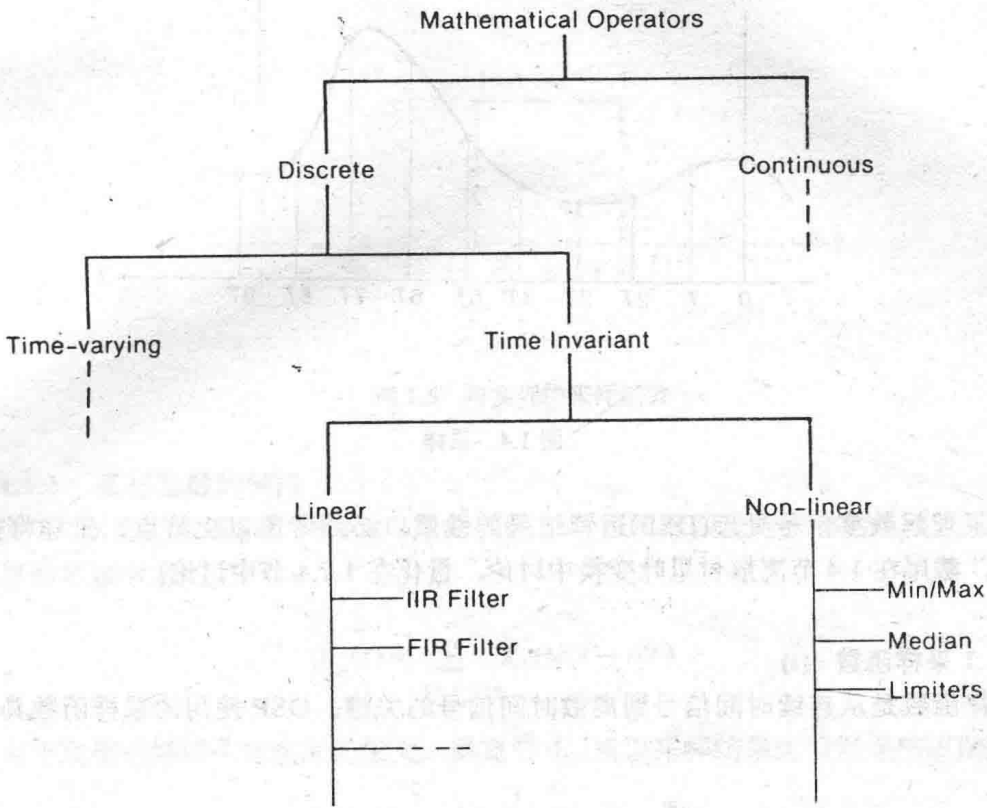


图 1.2 运算符的分类

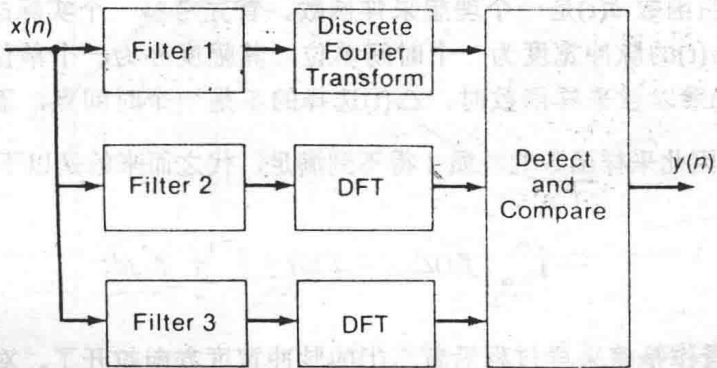


图 1.3 DSP 系统

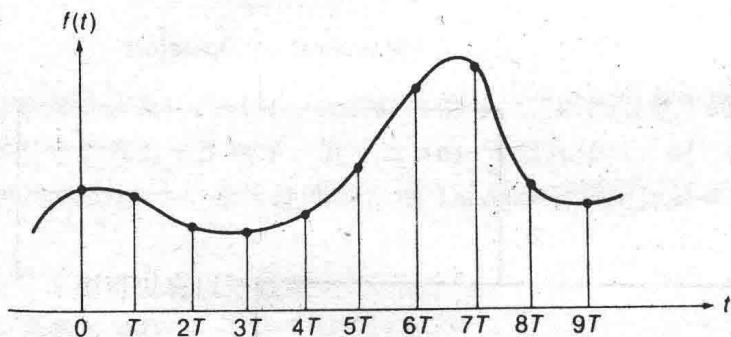


图 1.4 采样

为了理解数字信号处理(DSP)运算结果的性质, 必须考虑以上特点。采样将在 1.1.1 节讨论, 截尾在 1.4 节离散付里叶变换中讨论, 量化在 1.7.4 节中讨论。

1.1.1 采样函数 $\delta(t)$

采样函数是从连续时间信号到离散时间信号的关键。DSP 使用的采样函数具有以下性质:

性质 1

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t-T)dt = f(T) \quad (1.1)$$

性质 2

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-T)dt = 1 \quad (1.2)$$

以上式子中 T 为任意实数。

为了说明函数 $\delta(t)$ 是一个理想采样函数, 首先考察一个实际的采样函数 $\Delta(t)$, 如图 1.5 所示。 $\Delta(t)$ 的脉冲宽度为一个时间单位, 其幅度亦为一个单位。很明显它满足性质 2。但当 $\Delta(t)$ 乘以被采样函数时, $\Delta(t)$ 选择的不是一个时间点, 而是一个时间范围: 从 $-\frac{1}{2}$ 到 $+\frac{1}{2}$ 。因此采样函数的性质 1 得不到满足, 代之而来的是以下积分结果:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Delta(t+T)dt = \int_{T-\frac{1}{2}}^{T+\frac{1}{2}} f(t)dt \quad (1.3)$$

这可以看作是将采样过程沿着 $\Delta(t)$ 的脉冲宽度方向拉开了。对采样函数的较好近似应使 $\Delta(t)$ 的脉冲宽度更窄。但是, 当脉宽变窄时, 幅度必须增大以满足性质 2。在极限情况下, 我们可以看出理想采样函数具有无限窄的脉宽, 以使采样在一个时间点上进行; 同时理想采样函数的幅度无限大, 以使采样后的信号仍包含同样多的能量。

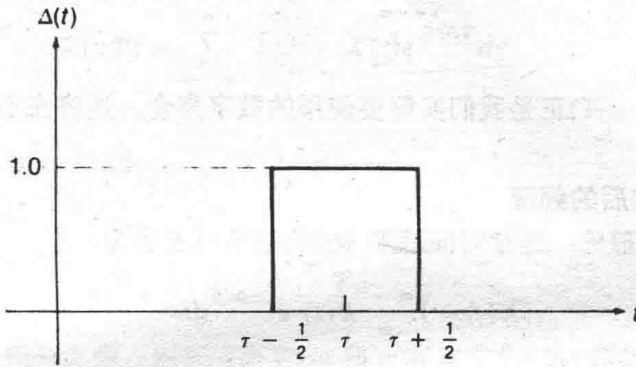


图 1.5 可实现的采样函数

1.1.2 采样函数的使用

图 1.6 示意了用理想采样函数以采样间隔 T 对连续函数进行采样的过程。采样结果的时间波形可表示为：

$$X_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(t)\delta(t - nT) \quad (1.4)$$

由于理想采样函数的幅度无限大，脉宽为 0，所以采样结果的波形无法以图形表示。

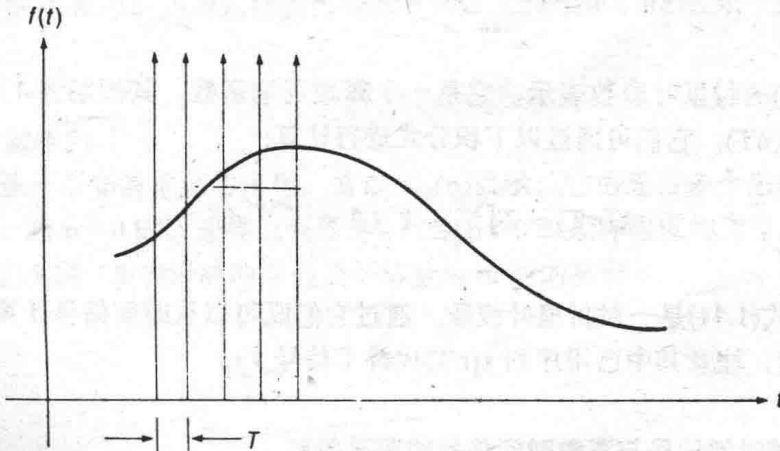


图 1.6 理想采样函数

需要强调的是 $x_s(t)$ 是由无穷多个连续时间信号 $x(t)\delta(t - nT)$ 组成的一个连续时间波形。采样函数仅当 $t = nT$ 时幅度非零，故 $x_s(t)$ 也可写为：

$$X_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(nT)\delta(t-nT) \quad (1.5)$$

在等式(1.5)中, $x(nT)$ 正是我们实际要使用的数字集合, 这将在下一节中讨论。

1.1.3 信号采样后的频谱

应用付里叶变换理论, 连续时间滤形 $x(t)$ 的频谱可表示为:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1.6)$$

利用频谱 $x(f)$ 可将时域波形表示为:

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (1.7)$$

由于以上式子对任意连续时间函数 $x(t)$ 均满足, 自然对 $x_s(t)$ 也满足:

$$X_s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X_s(t) e^{-j2\pi ft} df \quad (1.8)$$

将采样表达式代入 $\lambda x_s(t)$, 则有

$$X_s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} X(t)\delta(t-nT) \right] e^{-j2\pi ft} df \quad (1.9)$$

求和运算和积分运算可以交换顺序, 再应用性质 1 得到

$$X_s(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(nT) e^{-j2\pi fnT} \quad (1.10)$$

这就是 $x_s(f)$ 的付里叶级数表示, 它是一个频域周期函数, 其周期为 $1/T$ 。该付里叶级数的系数是 $x(nT)$, 它们可通过以下积分式进行计算:

$$X(nT) = T \int_{-\frac{1}{2}T}^{\frac{1}{2}T} X_s(f) e^{-j2\pi fnT} df \quad (1.11)$$

式(1.10)和式(1.11)是一对付里叶级数, 通过它们既可以从时间信号计算频谱, 也可从频谱计算时间哈。注意其中已用序列 $x(nT)$ 代替了信号 $x_s(t)$ 。

1.1.4 连续时间信号与离散时间信号的频谱关系

对式(1.7)在 $t=nT$ 处求值并使其等于式(1.11)的右边, 则得到两个频谱间的关系如下:

$$X(nT) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi fnT} df = T \int_{-\frac{1}{2}T}^{\frac{1}{2}T} X_s(f) e^{-j2\pi fnT} df \quad (1.12)$$

式(1.7)的右边可表示为无穷多个有限积分之和:

$$X(nT) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{\frac{2m-1}{2T}}^{\frac{2m+1}{2T}} X(f) e^{j2\pi f n T} df \quad (1.13)$$

代入 $f = \lambda + \frac{m}{T}$ 及 $df = d\lambda$ 得

$$X(nT) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{-\frac{1}{2T}}^{\frac{1}{2T}} X(\lambda + \frac{m}{T}) e^{j2\pi \lambda n T} e^{j2\pi \frac{m}{T} n T} d\lambda \quad (1.14)$$

将求和运算移入积分之内, 对所有整数 m 和 n 有 $e^{j2\pi mn} = 1$, 再将积分号内与式(1.11)类似的部化简可得如下关系:

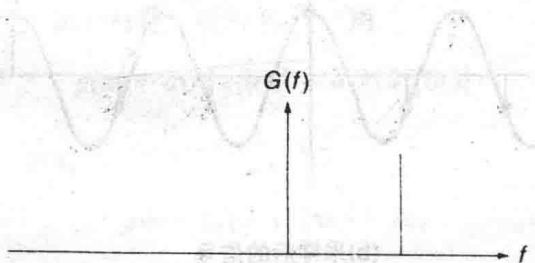
$$X_s(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} X(f + \frac{m}{T}) \quad (1.15)$$

上式表明采样后的时域频谱等于连续时域频谱无穷多个移位变化之和, 移位量就等于采样频率 $1/T$ 。考察在什么条件下两个频谱相等是很有意思的。当连续时间波形没有大于 $\frac{1}{2T}$ 的频谱成份时, 两个频谱在频率范围 $-\frac{1}{2T}$ 到 $\frac{1}{2T}$ 内相等。当然采样后的时间频谱对所有频率周期性地重复同一波形, 而连续时间频谱在特定的频率范围之外均为零。

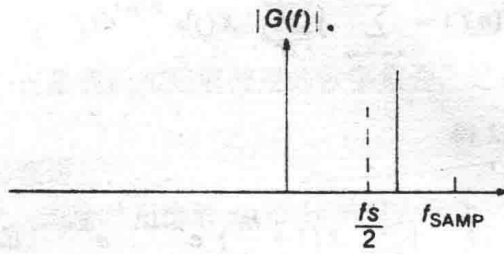
由上述讨论可得到著名的奈奎斯特采样准则: 当采样频率大于连续时间波形最大频率成份的两倍时, 可以从采样后的波形完全重建原来的连续时间波形。反之, 如果以小于连续波形最大频率成份两倍的频率采样, 则出现混淆。当从一个混淆的波形重建原来的连续时间信号时, 重建的结果就会发生畸变, 畸变程度决定于混淆的程度。图 1.7(a)到图 1.7(c)表示了有混淆和无混淆的采样信号频谱。图 1.8(a)到图 1.8(c)表示了从一个有混淆信号重建的波形。

1.1.5 冲激序列

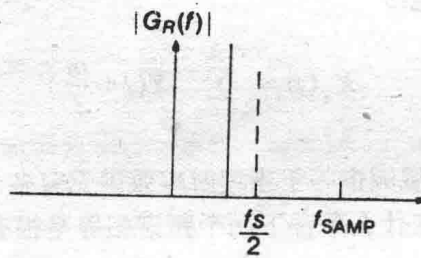
冲激序列是一个非常重要的序列, 常以 $U_0(n)$ 表示。它由无穷多个采样值组成, 这无穷多个采样值, 当 $n=0$ 时, 采样值幅度为 1, 当 $n \neq 0$ 时采样幅度均为零。任一序列均可移一个常数, 因此图 1.9 表示脉冲序列及平移量为 m 时的波形。



(a)输入频谱

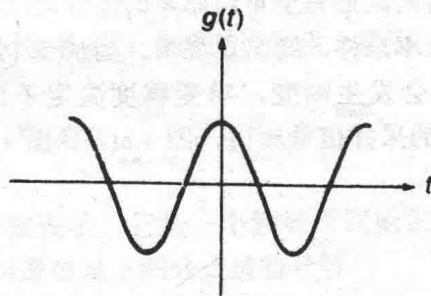


(b) 采样后的频谱

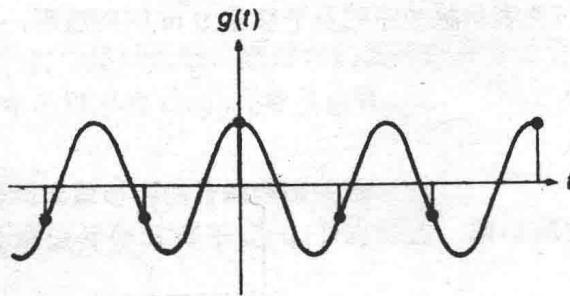


(c) 重建后的频谱

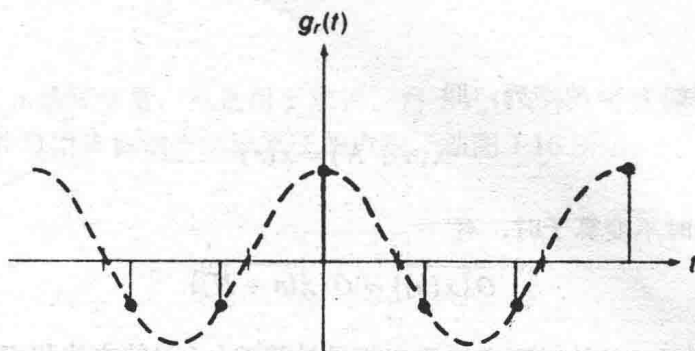
图 1.7 频域混淆



(a) 输入连续时间信号



(b) 采样后的信号



(c)重建后的信号

图 1.8 时域混淆

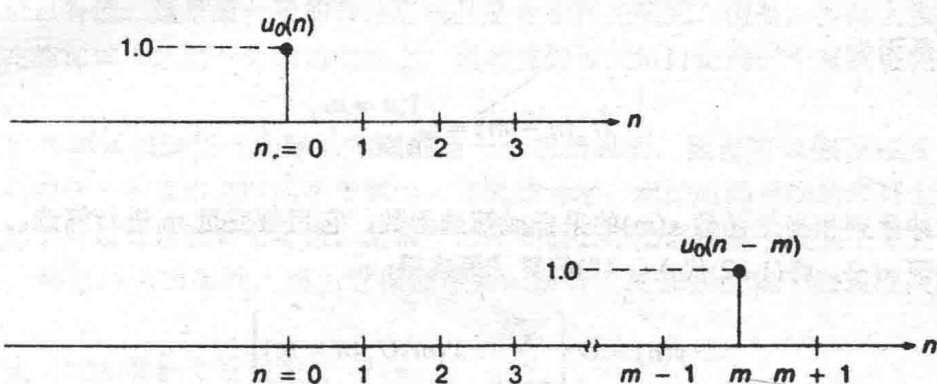


图 1.9 冲激序列的平移

1.2 线性时不变算子

最常用的 DSP 算子是线性且不随时间变化的线性时不变(编记为 LTI)算子。其线性性质可述如下:

给定有穷序列 $x(n)$ 及 n 维空间中的算子 $O\{\}$, 设

$$y(n) = O\{x(n)\} \quad (1.18)$$

如果

$$x(n) = ax_1(n) + bx_2(n) \quad (1.19)$$

其中 a 和 b 是常数, 如 $O\{\}$ 是一线性算子, 则

$$y(n) = aO\{x_1(n)\} + bO\{x_2(n)\} \quad (1.20)$$

时不变性质是指: 如果

$$y(n-m) = O\{x(n-m)\} \quad (1.21)$$

时不变性质也可表述为:

如果 $x(n)$ 是周期为 N 的序列, 即

$$x(n + N) = x(n)$$

那么当 $O\{\}$ 为时不变算子时, 有

$$O\{x(n)\} = O\{x(n + N)\}$$

下面我们用算子 $O\{\}$ 的时不变性质来指导计算 $O\{x(n)\}$ 的方法和表达式。首先可以用脉冲序列以另一种方式表示 $x(n)$:

$$X(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} X(m)U_0(n-m) \quad (1.22)$$

这是因为

$$U_0(n-m) = \begin{cases} 1, n=m \\ 0, \text{其它} \end{cases} \quad (1.23)$$

脉冲序列相当于函数 $x(m)$ 的采样或筛选函数, 它用哑变量 m 进行筛选, 以找到唯一的值 $x(n)$ 。将(1.22)代入(1.18)的算子等式得:

$$y(n) = O\left\{\sum_{m=-\infty}^{\infty} X(m)U_c(n-m)\right\} \quad (1.24)$$

算子 $O\{\}$ 只作用于 n 的函数, 应用线性性质有:

$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} X(m)O\{U_0(n-m)\} \quad (1.25)$$

当一冲激序列作用于其输入时, 每个算子都有一个输出集作为响应。我们用 $h(n)$ 表示相应的脉冲响应, 那么

$$h(n) = O\{u_0\} \quad (1.26)$$

该冲激响应时 $O\{\}$ 具有特殊意义, 因为当一冲激序列作用于图 1.1 的输入端时, 其输入序列就是冲激响应 $h(n)$ 。根据时不变特性有

$$h(n-m) = O\{U_0(n-m)\} \quad (1.27)$$

因此

$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} X(m)h(n-m) \quad (1.28)$$

式(1.28)表明 $y(n)$ 等于 $x(n)$ 与冲激响应 $h(n)$ 的卷积。将 $m = n-p$ 代入式中可得

$$y(n) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} h(p)x(n-p) \quad (1.29)$$

必须注意 m 和 p 是哑变量，只是用于求和。对于式(1.29)，很明显冲激响应完全反应了算子 $O\{\}$ 的特性并可用来标识表示该算子的方块，如图 1.10 所示。

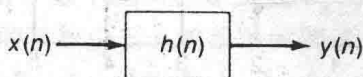


图 1.10 运算符的冲激响应表示

1.2.1 因果性(Causality)

到目前为止，在序列和算子的数学描述中，均假设了在有任何输入激励之前，算子的脉冲响应也可以有值。这是最一般的表达形式且适合于理论研究。但是，实际上没有一个物理系统能在施加输入之前产生输出响应上。因此我们可以将讨论局限于真实世界存在的算子和序列。

首先我们必须认识到任一实际的序列都有一个起始时间，因而可以假设在真实系统中，一个序列的任一元素当其时间小于零时，其值均为零。起始时间更晚的序列也可由此表达，因为开始可以有任意多个零值。但最早的非零值必须出现在等于或大于零处。序列和算子的这一特性称为因果性，因为它保证序列的所有性质都是由某一物理现象所引起的。

由此，式 (1.28)卷积关系变为

$$y(n) = \sum_{m=0}^{\infty} h(m)x(n-m) \quad (1.30)$$

由于冲激响应是一个序列，且它在 $m < 0$ 时不能有值，所以上式是顺乎自然的。

1.2.2 差分方程

所有的离散、线性、因果时不变算子都可用 N 阶差分方程从理论上描述：

$$\sum_{m=0}^{N-1} a_m y(n-m) = \sum_{p=0}^{N-1} b_p x(n-p) \quad (1.31)$$

其中 $x(n)$ 是算子的输入激励， $y(n)$ 是算子的输出结果。用 a_0 对以上方程中的系数归一化，不失一般性，(1.31)可用如下方程代替：

$$y(n) + \sum_{m=1}^{N-1} a_m y(n-m) = \sum_{p=0}^{N-1} b_p x(n-p) \quad (1.32)$$

其等价形式为

$$y(n) + \sum_{p=0}^{N-1} b_p x - \sum_{m=1}^{N-1} a_m y(n-m) \quad (1.33)$$

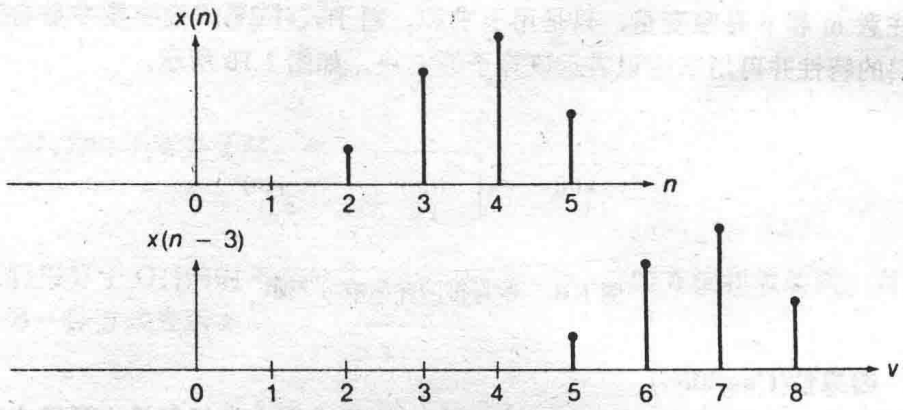


图 1.11 序列的平移

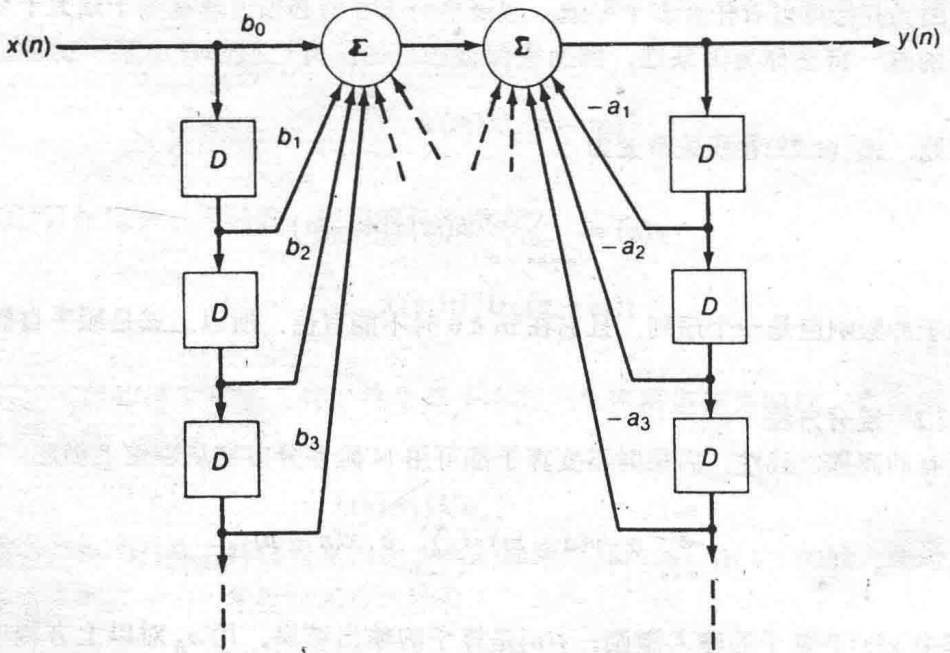


图 1.12 线性运算符的流图结构

或

$$y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + b_2 x(n-2) + \dots$$

$$+ b_{N-1} x(n-N+1) - a_1 y(n-1) - a_2 y(n-2)$$

$$- \dots - a_N y(n-N+1)$$

(1.34)